

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ,
PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**ZÁVITOVÁ SPOJENÍ U DÍLŮ VYROBENÝCH METODOU 3D
TISKU**

**COMPARISON OF THREADED CONNECTIONS ON PARTS
MANUFACTURED WITH 3D PRINTING**

AUTOR: Luděk Hejhal

STUDIJNÍ PROGRAM: VES

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

PRAHA 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hejhal** Jméno: **Luděk** Osobní číslo: **465376**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Závitová spojení u dílů vyrobených metodou 3D tisku

Název bakalářské práce anglicky:

Comparison of threaded connections on parts manufactured with 3D printing

Pokyny pro vypracování:

Provedte analýzu problému použití závitových spojení u dílů vyrobených pomocí 3D tisku. Zaměřte se na plastové výtisky.

- Rešerše literatury a zdrojů na toto téma
- Přehled používaných druhů závitových spojení
- Přehled vyráběných závitů a jejich vlastností s ohledem na 3D tisk
- Výroba vzorků závitů a testování v laboratorních podmínkách
- Závěry a doporučení pro nasazení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Tomíček, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....
Luděk Hejhal

Anotace

Tato práce se zabývá analýzou problému použití závitových spojení u plastových výtisků vyrobených metodou 3D tisku. Cílem práce je popsat jednotlivé druhy a vlastnosti závitových spojení, které lze použít na výtiscích při dané metodě. V experimentální části je popsána a testovaná výroba dílčích vzorků v laboratorních podmínkách. Následně jsou dle získaných informací určeny závěry a doporučení pro nasazení.

Klíčová slova

3D tisk, FDM tisk, PLA, metody závitových spojení u plastových výtisků

Annotation

This Bachelor thesis deals with the analysis of the problem of using threaded connections in plastic parts produced by 3D printing. The aim of this work is to describe the various types and properties of threaded connections that could be used in a given method of printed parts. In the experimental part is described and tested production of partial samples under laboratory conditions. Consequently, according to the obtained information are determined conclusions and recommendations for deployment.

Keywords

3D print, FDM print, PLA, using threaded connections in plastic parts produced by 3D printing

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Janu Tomíčkovi, Ph.D za ochotu, vstřícnost a pomoc při zpracování této práce.

Dále děkuji Tomášovi Mlejnkovi, konstruktérovi firmy Slévárna Vysoké Mýto s.r.o., že mi dal cenné informace k dané problematice a umožnil užití firemní 3D tiskárny. Děkuji také za informace Štěpánu Havlovi, konstruktérovi firmy SOR Libchavy s.r.o., za přínosné konzultace. Děkuji firmě Iveco Bus Czech Republic a.s. za provedení trhací zkoušky a firmě SIMAF CZ s.r.o za spolupráci a poskytnuté vzorky k testování.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu ve všem, co dělám.

Obsah

Úvod.....	3
1. Teoretická část	4
1.1 3D Tisk.....	4
1.2 Metoda FDM/FFF.....	5
1.3 Historie šroubů	5
1.4 Šroubové spoje	6
1.5 Potřeba šroubových spojení.....	6
1.6 Problematika a odhad vlastností šroubových spojů	6
1.7 Tepelná expanze.....	7
1.8 Tečení.....	8
1.9 Vrubová citlivost.....	8
1.10 Typy závitových spojení	9
1.11 Spojovací šrouby.....	9
1.11.1 Spojení vrutem	9
1.11.2 Spojení speciálním šroubem do plastu	9
1.11.2.1 Samořezné šrouby.....	9
1.11.2.2 Samotvářecí šrouby.....	11
1.11.2.3 Závit typu Delta PT	12
1.11.2.4 Závit typu HI-LO.....	13
1.11.2.5 Závit typu Plastite.....	13
1.11.3 Vliv rychlosti utahování.....	14
1.11.4 Vliv velikosti předtištěné díry	14
1.12 Spojení závitovou vložkou.....	15
1.12.1 Tepelně působící závitové vložky.....	15
1.12.2 Ultrazvukové závitové vložky.....	16
1.12.3 Zatištěné vložky se závitem	16
1.12.4 Lisované vložky	16
1.13 Tištění závitů	17
1.13.1 Vhodnost profilu závitu ke 3D tisku	18
1.14 Řezání závitů na tištěných dílech.....	18
1.15 Použití Nylonových šroubů	19
1.16 Kapsa pro matici	19

1.17	Návrh domku	20
1.18	Použitá FDM tiskárna	21
1.19	PLA Materiál	22
1.20	Trhací stroj	22
2	Praktická část	23
2.1	Výroba testovacích vzorků	23
2.2	Příprava k testování	25
2.3	Průběh testování	25
2.4	Ověření výpočtem	28
	Závěr	30
	Seznam použitých zdrojů	31
	Seznam použitých zkratk a symbolů	33
	Seznam obrázků a grafů	34
	Seznam tabulek	35
	Přílohy	36

Úvod

V této práci se věnuji problematice, která se zabývá závitovými spojeními u plastových výtisků vyrobených metodou 3D tisku. Při výrobě sestavy nebo dílů může vzniknout potřeba rozebíratelného spoje, kterou lze realizovat závitovým spojením.

V první části práce se věnuji teoretickému úvodu, v kterém se zaměřuji na charakterizování vlastností dílčích metod závitových spojení. Dále se věnuji popisu jednotlivých výhod a nevýhod, kde je shrnuta ekonomická výhodnost, funkčnost a využitelnost.

V druhé části, tedy části praktické, se zabývám výrobou přípravku pro testování jednotlivých typů závitových spojení. Testování dílčích závitových spojení na pevnost spojení v tahu, ze kterých následně zpracuji informace pro konečné závěry a doporučení.

1. Teoretická část

1.1 3D Tisk

3D rapid prototyping (zkráceně RP), neboli jinak také 3D tisk, je v posledních letech rychle se rozvíjejícím segmentem, díky jeho přínosům do všech odvětví průmyslu. Možnost využití 3D tisku je všude tam, kde je klasické konvenční uplatnění strojů a nástrojů časově náročné, finančně a materiálově nákladné, nebo kde klasická technologie nedovolí výrobu dílu. Touto metodou se nejen vyrábí díly prototypového charakteru, pro funkční zkoušky, zkoušky k ověření smontovatelnosti sestav či designerským a architektonickým modelům, ale jsou vhodné například i k výrobě modelů odlitků a jaderníků ve slévárenské výrobě. Touto metodou se také začínají vyrábět modely náhrad ve zdravotnictví. Proto 3D tisk najde uplatnění jak v produkci malosériové či kusové výroby tak i u běžného domácího použití. 3D tisk je soubor metod technologií aditivní výroby (proces, u kterého vzniká konečný fyzický výrobek jednotlivým nanášením roztaveného stavebního materiálu v tenkých vrstvách na sebe), který svými vlastnostmi umožňuje v relativně krátké době převést digitální model na reálný hmotný produkt. Aditivní technologie výroby se začaly objevovat už v 80. letech 20. století. Výhodou aditivní výroby je, že není téměř omezena tvary objektu a může vzniknout díl dle vašich specifikací nebo představivosti. Rychlost vzniku nových dílů usnadňuje práci vývojářům předcházet různým možným problémům, které by mohli mít negativní následek na kvalitu a funkčnost výrobku. Přes vyšší počáteční náklady při pořízení samotné 3D tiskárny, jsou variabilní náklady na tištěný materiál a provoz velmi nízké, navíc odpadají mzdové náklady, a tak se využití této technologie začíná hojně objevovat jak v kusové, tak i malosériové výrobě. Malé skladovací prostory u výroby metodou 3D tisku jsou také další předností této výrobní technologie, vzhledem k tomu, že 3D tiskárna může tisknout až v případě potřeby, proto zde nevznikají polotovary či žádný jiný odpadní materiál, který je potřeba uskladňovat a manipulovat s ním. [1,5]

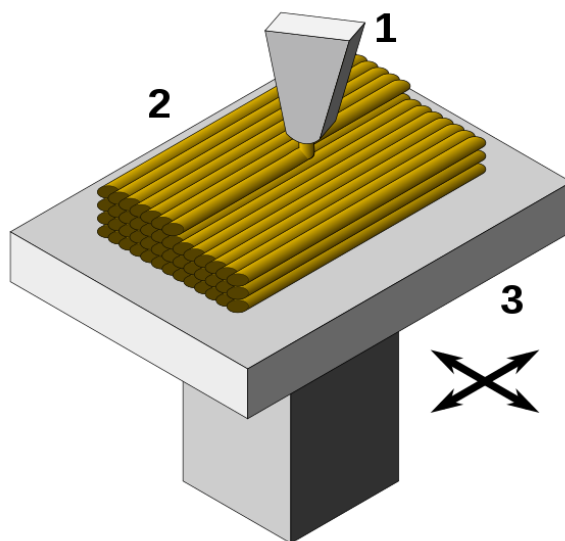
Samozřejmě jako každá technologie, tak i 3D tisk má své limity. Mezi nevýhody 3D tisku jednoznačně patří “stáří” této technologie, přesněji řečeno krátká doba této technologie na trhu. Samotný 3D tisk je teprve na začátku svého vývoje, kdy se technologie zrychluje, zpřesňuje a objevují se nové stavební materiály. 3D tiskárny před sebou mají nepochybně ještě dlouhý kus vývoje ke stoprocentně bezproblémovým výtiskům. U složitějších tvarů, které nedodrží podmínky nanášecích úhlů či překlenutí jsou nutné podpory, nebo mosty, které se musí následně odstraňovat. Model je velikostně omezen také tiskovým prostorem, u velkých dílů dochází k velkému vnitřnímu pnutí a běžně používané materiály nevykazují tak velké pevnosti jako například u technologie vstřikovaných plastů.

1.2 Metoda FDM/FFF

Fused Deposition Modeling (FDM), patří mezi jednu z nejrozšířenějších metod profesionálního 3D tisku, která zároveň stála u zrodu celého hnutí levných běžně dostupných 3D tiskáren. Hlavní rozdíl mezi tiskárnou FDM a FFF (Fused Deposition Modeling) je, že FDM je registrovaná ochranná značka společnosti Stratasys a tedy ji ostatní výrobci tiskáren nemohou používat.

FDM je aditivní metoda, jejímž principem je protlačování termoplastického vlákna zvaného filamentu tryskou s daným průměrem a dané teplotě. Filament je v trysce roztaven a následně nanášen v podobě tenké horizontální vrstvy na tiskovou vyhřívanou podložku. Po dokončení jedné vrstvy modelu se tryska nebo tisková podložka vertikálně posune o výšku tištěné vrstvy a dojde k nanesení další vrstvy. Takto se na sebe vrstvy nanášejí až do podoby tisknutého objektu.

Technologie FDM Metoda Fused Deposition Modeling byla patentována v roce 1989 zakladatelem a vlastníkem ochranné známky společnosti Stratasys, Inc. S. Scottem Crumpem. Po expiraci patentu v roce 2009 došlo k velkému rozšíření této technologie mezi běžné uživatele. [3]

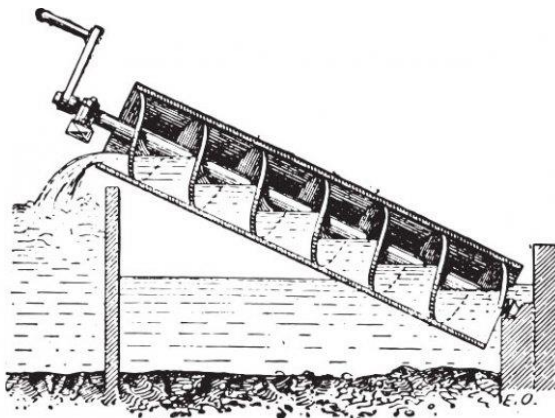


Obrázek 1 Schéma FDM tisku

1.3 Historie šroubů

Dle poznatků byl s největší pravděpodobností první šroub vynalezen řeckým matematikem a fyzikem Archimédem ze Syrakús ve 3. stol. př. n. l. Tento šroub měl zcela jiný účel, nežli mají šrouby v dnešní době. Sloužil k přečerpávání vody (obr. 1). Následně dalším velkým objevem z doby kolem 1. stol. př. n. l. bylo nalezení dřevěného šroubu, jehož uplatnění bylo při mandlování prádla a u lisů na lisování olivového oleje. V dnešní době by tyto šrouby byly označovány jako pohybové. V 15. století se objevili první kovové spojovací šrouby. První dochovaná zmínka o kovovém šroubu s průběžnou drážkou je datována do roku 1513, kdy jej vyrobil a použil německý hodinář. Ve 2. pol.

16. stol se objevuje již nám známý šestihranný tvar hlavy šroubu a matice, jejich výroba probíhala manuálně. První krok k automatizaci přišel roku 1800, kdy Henry Maudslay zdokonalil suport soustruhu. Tento vynález umožnil výrobu závitů řezáním. Válcovaný závit se ve větší míře začal objevovat až v 50. letech 20. stol. [1]



Obrázek 2 Přečerpávací šroub

1.4 Šroubové spoje

Závit u šroubového spoje stále patří k mimořádně důležitým konstrukčním prvkům. Dnes převážně slouží k vzájemnému spojení strojních součástí, které na sebe funkčně navazují. Je též základem u pohybových šroubů, kde je podstatou měnit pohyb rotační na pohyb přímočarý. Šrouby lze též použít k nastavování vzájemné polohy určitých součástí nebo k měření. Pokud je závit použitý přímo na spojovaných součástech s funkcí konstrukčního prvku, tak slouží k realizaci přímého spojení součástí. K nepřímému rozebíratelnému spojení součástí slouží závitové spojovací součásti. Šroubové spoje můžeme taktéž dále rozdělit na spoje bez předpětí a na spoje s předpětím. Většina šroubových spojů je konstruována pro jejich užití jako spoje s předpětím. Spoje bez předpětí jsou méně běžné.[1].

1.5 Potřeba šroubových spojení

Potřeba 3D vytištěných dílů vzniká z několika důvodů. Model je větší než dovoluje tisk 3D tiskárny, a proto je model rozdělen na sestavu z několika dílů. U větších dílů dochází vlivem tuhnutí materiálu k většímu vnitřnímu pnutí, které je nežádoucí a díl musí být rozdělen na několik menších částí. Nutnost dělení modelu vzniká také u výrobku, u kterého je z konstrukčního hlediska vznesen požadavek tisknout nosné díly. 3D tisk vždy nedovolí, aby nosné části měly vlákna orientována ve směru působících sil. Dále je uplatnění šroubových spojů u dílů, které jsou části velkých sestav.

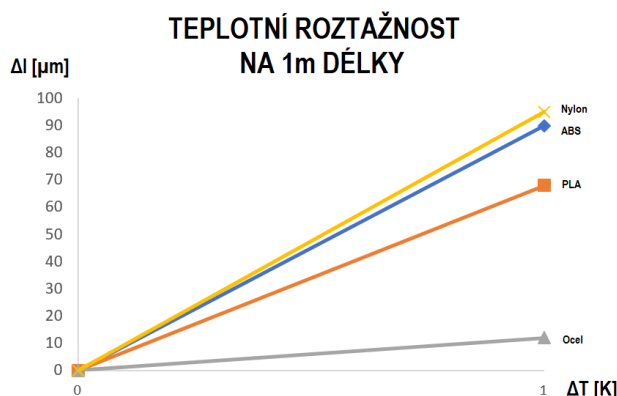
1.6 Problematika a odhad vlastností šroubových spojů

Modul pružnosti v tahu (Youngův modul) je nejlepším indikátorem toho, jak se bude plast vyvíjet a reagovat na šroubový spoj. Obecně platí, že čím menší je Modul pružnosti v tahu, tím více materiálu bude proudit mezi profil zubů šroubu a dovolí tím lepší tvorbu závitů. Termoplasty s vyšším modulem pružnosti také umožňují vytváření

závitů, ale obvykle vyžadují upevňovací prvek s nízkým úhlem šroubovice, aby se zabránilo nadměrnému krouťicímu momentu při montáži šroubu. Plasty s vysokým modulem pružnosti, včetně termosetických polymerů, jsou příliš tuhé pro tváření a vyžadují upevňovací prvky pro řezání závitů. Nerespektování těchto faktů může nepříznivě ovlivnit pevnost šroubového spoje. Použití výplní, na upevnění šroubového spoje, může mít příznivý vliv na změnu jedné nebo více vlastností u termoplastů. Například pryskyřice, zvyšující odolnost proti rázům, mají tendenci zvyšovat tažnost spoje na úkor jejich modulu pružnosti v tahu. Maziva a silikony přidávané pro tvarování závitů, mají tendenci snížit točivý moment při průniku vrutu, ale mohou negativně ovlivnit sílu sevření spoje.

1.7 Tepelná expanze

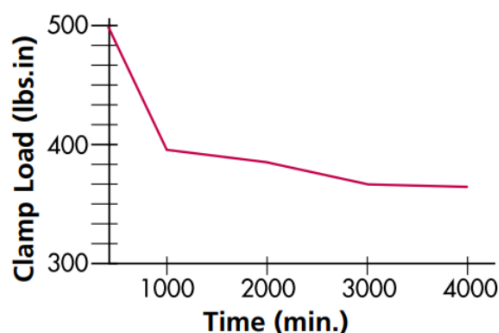
V závislosti na teplotě prudce roste poměrné prodloužení délky testovacích vzorků. Plasty expandují mnohem rychleji než kovy, které jsou vystaveny stejnému tepelnému zatížení. Protože velmi málo spojů pracuje při konstantních teplotách, sevření spoje mění svůj charakter. Při vyšších teplotách roste sevření spoje z důvodů teplotní roztažnosti, avšak klesá pevnost.



Obrázek 3 Teplotní roztažnosti materiálů

1.8 Tečení

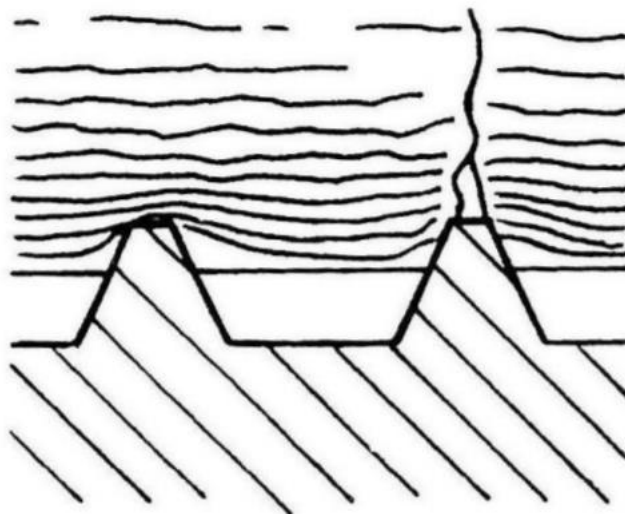
Tečení je kontinuální deformace plastu pod konstantním zatížením. Rychlost tečení má za následek, že při rostoucí teplotě a s rostoucím tahovým, stříhovým nebo ohybovým napětím se všechny plasty budou trvale deformovat. Tečení způsobuje ztrátu svěrné síly spoje. Data tečení jsou obvykle zaznamenávány jako funkce deformace a času. Obrázek 4 dole ukazuje ztrátu svěrné síly při stabilní teplotě, přes 65 hodin. [18]



Obrázek 4 Graf závislosti času na svěrné síle

1.9 Vrubová citlivost

Vrubová citlivost je nežádoucí jev, který negativně ovlivňuje tvářený závit ke vzniku praskliny. Při použití speciálních šroubů pro plasty, které závit tváří dochází vlivem zaobleného zubu k menší vrubové citlivosti na rozdíl od závitů, které závit řezají, kdy vlivem ostrého zubu může dojít k lomu. Obrázek 5 dole ukazuje vznik vrubu. [6]



Obrázek 5 Vznik vrubu

1.10 Typy závitových spojení

1.11 Spojovací šrouby

Spojovací šrouby slouží převážně k pevnému rozebíratelnému spojení u strojních součástí. Podle účelu a použití se mohou tyto spojovací šrouby dělit na maticové šrouby (s hlavou a maticí), závrtné šrouby a šrouby pro zvláštní účely. Spojovací šrouby jsou standardizovány řadou norem.

Tato kapitola bude dále věnována problematice spojovacích šroubů, které jsou určeny pro montáž do plastů v dalších kapitolách budou popsány speciální závitové vložky, řezání a tištění závitů [2].

1.11.1 Spojení vrutem

Spojení součástí vrutem je nejběžnější metoda závitového spojení na dílech tištěných metodou 3D tisku, její nespornou výhodou je jednoduchost aplikace této metody, kterou lze provádět velmi rychle a efektivně. Tato metoda je zřejmě nejvýhodnější, pokud se při výrobě spoje používá materiál s nízkou schopností rozlišení jako je například nejběžněji používaný materiál PLA s vysokou schopností nanášení. Neklade velké nároky na prostor pro díru vrutu a finanční náročnost je nízká. Díra pro vrut by měla být předtištěná ve velikosti 80% průměru závitu pro ideální vlastnosti závitového spojení. Nevýhodou použití vrutu je opakovaná rozebíratelnost spoje, kdy dochází k poruše závitu a následný kolaps šroubového spoje. Minimální doporučená šířka domku je běžně udávána jako 2x jmenovitý průměr montovaného vrutu.

1.11.2 Spojení speciálním šroubem do plastu

Tyto šrouby se dělí podle způsobu vytváření daného závitu, na samotvářecí a samořezné. Nejběžněji je možné setkat se závitotvornými šrouby při použití šroubového spoje ve dřevě, v plastu, ale také v jiných materiálech jako například hliník a beton. Další možností využití závitotvorných šroubů je v lékařství, například pro fixaci fraktur kostí.

1.11.2.1 Samořezné šrouby

Při návrhu spoje plastových komponentů se v současné době často používá samořezný šroub. Tyto samořezné šrouby jsou nejčastěji kalené ocelové šrouby, které si vytlačí nebo samy vyříznou závit v hladkých válcových předtištěných dírách.

Tyto samořezné šrouby pro plasty mají speciální profily závitů navržené pro ideální vlastnosti. Profily závitů jsou užší a pohybují se v rozsahu od 30 ° do 48 ° a mají velké stoupání profilu závitu. Dřík bývá zakončen tupým nebo ostrým kuzelem s prostorem pro odřezávanou třísky, aby se šroub snadněji zařezával do díry. To znamená větší axiální smykovou plochu, díky které je šroub odolnější proti vytržení na rozdíl od běžných vrutů. Běžný vrut typu B, typu AB a další standardní upevňovací prvky mají úhel profilu závitu 60°. Samořezné šrouby pro plasty výrazně snižují radiální namáhání

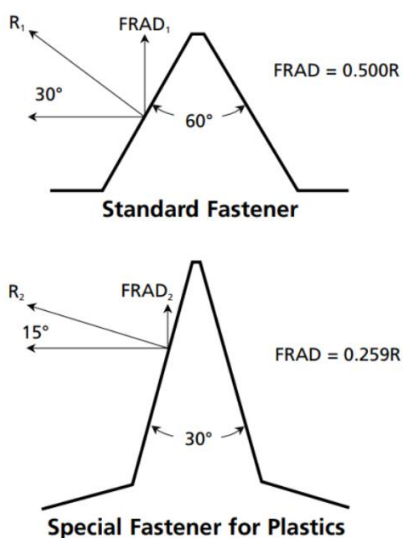
na upevňovací domek z plastu. Snížená radiální zátěž má za následek snížení pravděpodobnosti vzniku vyboulení, delaminace nebo lomu, proto je radiální síla nežádoucí.



Obrázek 6 Porovnání vrutu a speciálního šroubu do plastu

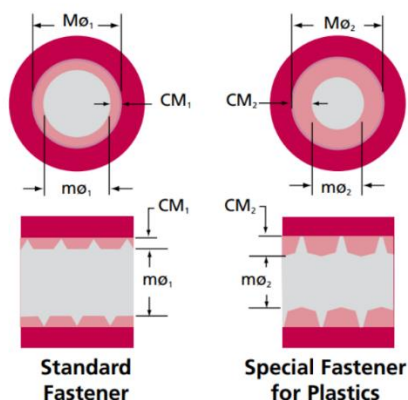
Samořezné šrouby vykazují vyšší hodnotu krouticího momentu, zvýšenou odolnost proti vytočení. Použití těchto šroubů dovoluje větší zúžení upevňovacího domku, což má za následek zkrácení doby tisku a ušetření nákladů. Nevýhodou tohoto typu spojení je častá montáž a demontáž, při které může dojít ke zničení vyřezaného závitu.

Na obrázku je schéma radiální síly mezi 60 ° závitem a 30 ° závitem. Vzniklá radiální síla u závitu s profilem 30 ° je přibližně o polovinu menší nežli u závitu s 60 °.



Obrázek 7 Porovnání profilu závitu

Při porovnání samořezného šroubu s vrutem je patrné, že se s polovičním úhlem profilu mění důležité parametry geometrie. Na profilu závitu vrutu a samořezného šroubu je jiná hodnota výšky a středního průměr závitu. [18]

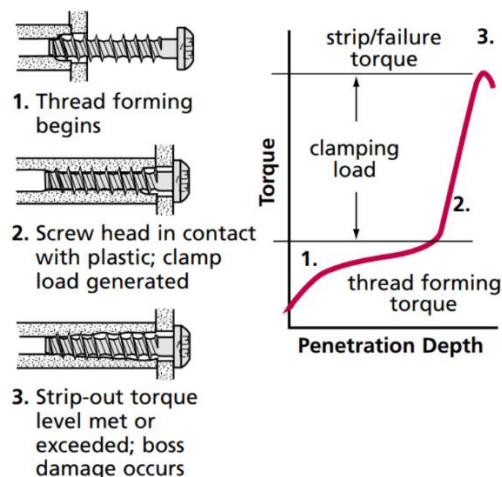


Obrázek 8 Porovnání průřezů vrutu a speciálního šroubu do plastu

1.11.2.2 Samotvářecí šrouby

Samotvářecí šrouby fungují na principu obtékání penetrovaného materiálu kolem závitu šroubu. Výhodou této metody je, že u ní nevzniká žádná tříska. Využití těchto šroubů nalezneme zejména tam, kde je kladen požadavek na velké napětí v materiálu, z důvodu zvýšení předpětí šroubového spoje proti uvolnění šroubu. Díky velké radiální a axiální síle sepětí spoje se u těchto šroubů výjimečně používají pojistné součástky jako pružné podložky atd. Nespornou výhodou je možnost opakované montáže a demontáže šroubu bez toho, že by se tím zničil již předtisknutý závit.

Během zašroubovávání šroubu dochází k tvarování materiálu, proto je třeba překonat tvářecí odpor vyvinutý materiálem a narůstající odporovou sílu s rostoucí hloubkou průniku závitu. Při dosednutí hlavy šroubu utahovací moment překonává pouze třecí sílu a vytváří předpětí spoje, která je nezbytně nutná pro funkční a spolehlivý šroubový spoj součástí. Proto je u těchto šroubů snaha o maximalizaci rozdílu kroutícího momentu, kdy je závit tvářen šroubem, a kroutícím momentem, kdy dochází k poruše šroubového spoje viz obrázek 9. [18]

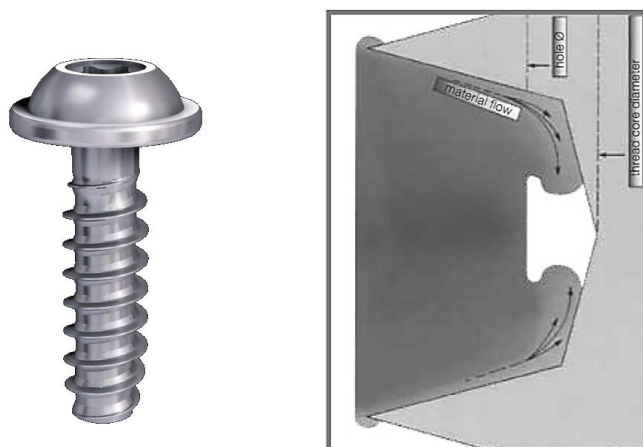


Obrázek 9 Graf závislosti kroutícího momentu na hloubce průniku

1.11.2.3 Závít typu Delta PT

Závít typu PT je nejběžněji používaný závít mezi závitotvornými šrouby pro spojování plastových dílů. Tento speciální profil šroubu byl vyvinut firmou EJOT, která si jej nechala patentovat pro aplikaci v termoplastech. Úhel profilu je oproti metrickému závitu poloviční, tedy 30° .

Šroub typu Delta PT má ve srovnání se šroubem s metrickým závitem stejný velký průměr závitu, avšak poloviční úhel špičky, odlišný střední průměr a výšku závitu. Výška profilu je téměř 1,5násobek metrického závitu s hrubou roztečí, což zvětšuje hloubku, do které se závit tvaruje. Šroub je tak obtečen větším množstvím materiálu a díky tomu má spoj větší únosnost viz obrázek (obr. 10). Delta PT má také rozšířenou rozteč závitu. Tím snižují nebezpečí stržení závitu v plastu. [7,18]

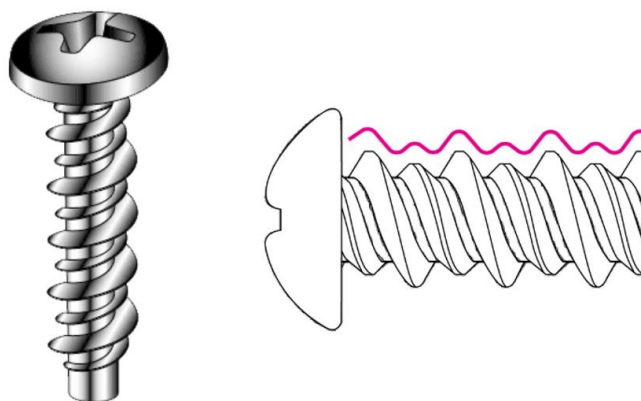


Obrázek 10 Šroub delta PT

1.11.2.4 Závít typu HI-LO

Profil tohoto speciálního šroubu se závitem typu HI-LO má dvojitou šroubovici, jednu šroubovici s vyšším a druhou s nižším průměrem závitu (obr.11). Větší šroubovice má vrcholový úhel profilu závitu 30° a vnější průměr je roven velkému průměru závrtného šroubu. Nižší profil má charakteristiku metrického závitu s vrcholovým úhlem 60° a výškou závitu rovným přibližně polovině výšky větší šroubovice [9].

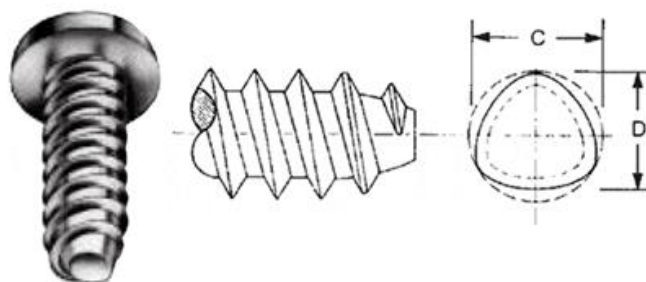
Mezera (viz. Obr.10), která vznikla nedokonalým obtékáním profilu šroubu Delta PT, je při aplikaci závitu typu HI-LO eliminována zaplněním menším závitem metrického charakteru. Při použití tohoto typu šroubu je zlepšeno obtékání závitu termoplastem a tím vzniká zvýšená únosnost spoje. [10]



Obrázek 11 Šroub Hi-Lo

1.11.2.5 Závít typu Plastite

Šrouby typu Plastite mají nekruhový příčný průřez závitu. Tento šroub má v průřezu trojúhelníkovitý tvar se značně zaoblenými vrcholy. Toto provedení způsobuje, že pružný plast se po zašroubování sevře kolem nekruhového šroubu a brání jeho samovolnému uvolnění při vibracích a otřesech. [2]



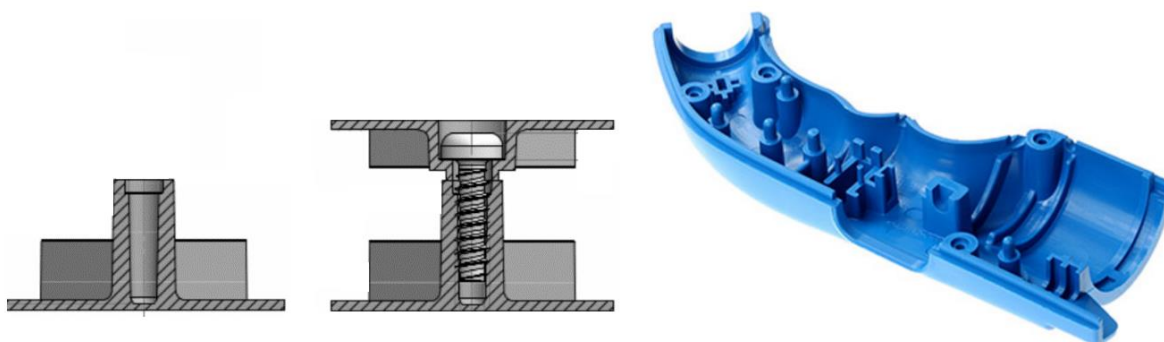
Obrázek 12 Šroub Plastite

1.11.4 Vliv rychlosti utahování

Při použití plastových spojů má teplo, vznikající v závislosti na šroubovací rychlosti, nezanedbatelný vliv na koeficient tření, který výrazným způsobem ovlivňuje celý proces šroubování. S rostoucí teplotou vzniká vyšší tření a nutnost použití vyššího točivého momentu pro utažení šroubu. Čím rychleji teplo ve spoji vznikne, tím více se akumuluje v místě vzniku, neboť ho systém nestačí odvádět. Akumulace tepla ve styku šroubu a penetrovaného materiálu závisí na rychlosti šroubování (rychlost přívodu tepla) a na schopnosti kondukce tepla penetrovaného plastového materiálu a pronikajícího šroubu. Pokud je tepelné ovlivnění v okolí plastového závitu příliš velké (například přiblížení teploty tání plastového materiálu), může se stát, že závit v důsledku změny mechanických vlastností nevydrží točivý moment a dojde tak k defektu. [16]

1.11.5 Vliv velikosti předtíštěné díry

Zapojení závitu je určeno průměrem díry ukotvovacího domku, díky které je určeno množství materiálu působící na bok závitu. Pokud by byl pilotní průměr rovný průměru šroubu závit by byl zapojen na 0%. Běžný doporučený průměr díry je od 80% průměru jmenovitého závitu a obvod domku je doporučen jako 2x průměr jmenovitého závitu dle typu šroubu. Délka zapojení šroubu by měla být minimálně 2x průměr jmenovitého průměru šroubu. U speciálních profilů se tato hodnota může lišit, měla by však být udávána výrobcem. Pokud vytištěný průměr bude menší než doporučených 80% průměr jmenovitého závitu, nezvyšuje se pevnost spojení, ale pouze krouticí moment, který má za vliv vyboulení domku.

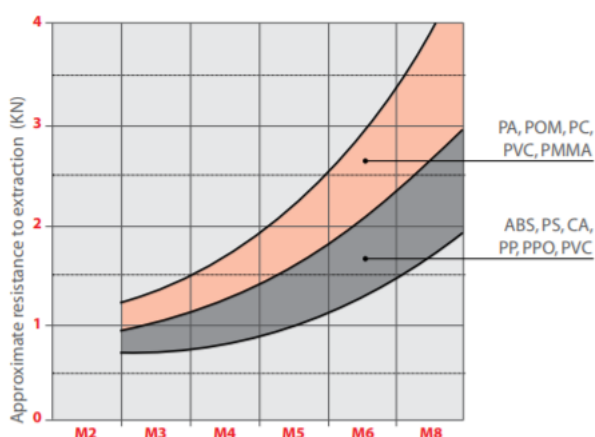


Obrázek 13 Domek a jeho použití

1.12 Spojení závitovou vložkou

Pro spojování plastových dílů také lze využít kovových vložek. Kovové vložky jsou prvky, které jsou instalovány do plastu prostřednictvím mnoha procesů, včetně ultrazvukového ohřevu a lisování. Kovové vložky jsou typicky závitové prvky, nejběžněji s metrickým profilem. Díky tomu je závitové spojení odolnější a spolehlivější. Tato metoda je také vhodná, pokud musí být výrobek opakovaně demontován a znovu instalován.

Přímé vroubkování (rovnoběžně s délkou vložky) zvyšuje odolnost proti krouticímu momentu, drážky v kolmém směru s osou vložky zvyšují odolnost proti vytržení. Diagonální, nebo šroubovitě vroubkování vyrovnává odpor vůči silám v obou směrech. Šestihranný, nebo kosočtvercový tvar vroubkování je nejběžnější. [14,15,17]



Obrázek 14 odhadovaná síla proti vytržení

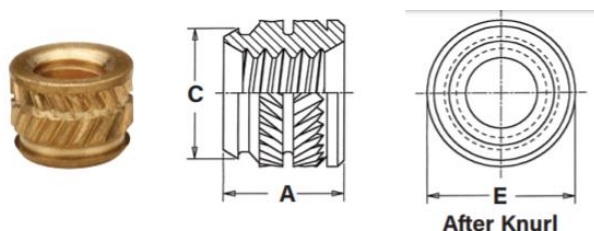
1.12.1 Tepelně působící závitové vložky

Do příruby, ve které je předtíštěný otvor (velikost otvoru i příruby je specifikovaná výrobcem vložky) se vkládá závitová vložka, která je zahřívána pájkou s montážním hrotem, která je nastavena na teplotu tavení penetrovaného materiálu. Vnější stěny vložky mohou být rovné nebo zkosené. Kuželové vložky nabízejí lepší vyrovnaní při vkládání do otvoru (pokud je otvor správně vytvořen).

Při montáži se zahřívá pájkou závitová vložka, která je zasouvána do otvoru. Tato vložka roztaví malou část obvodu otvoru. Změkčený plast proudí do prostoru vroubkovaného vzoru vložky a následně tuhne. Díky tomu vytvoří vložka s penetrovaným materiálem pevné spojení. Vzhledem k tomu, že proces je snadno ovladatelný, s relativně nízkou cenovou náročností, je vhodný i k sériovému použití. [12,14]

1.12.2 Ultrazvukové závitové vložky

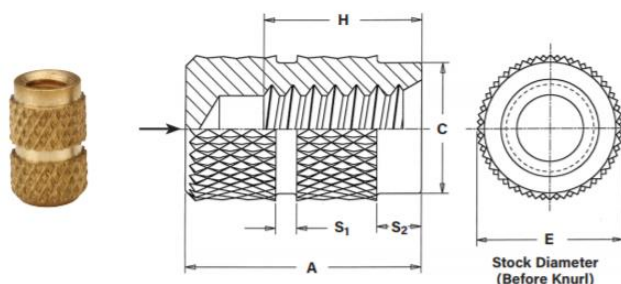
Podobně jako pájku lze použít ultrazvuk pro roztavení obvodu díry. Teplo k potřebnému natavení termoplastického materiálu vytváří ultrazvukový proces vibrační frekvencí. Rychlost je srovnatelná s ohřevem pomocí pájky, ale vyžaduje přesnější regulaci a může vytvořit větší oblast roztaveného plastu, která může mít negativní následek na odlupování materiálu. Další nevýhodou je, že ultrazvukové procesy mohou být hlasité a automatizovat tento proces může být podstatně náročnější. [12,14]



Obrázek 15 IUA vložka

1.12.3 Zatištěné vložky se závitem

Vložky se závitem jsou vloženy do předpřipraveného místa dílů, kdy je proces pozastaven, a následně je vložka zatištěna do plného materiálu. Tímto způsobem plast zcela zapouzdruje vložku, což obecně vede k nejlepší celkové vazbě a eliminuje potřebu jakéhokoli následného zaváděcího procesu. Tento postup však trvá určitý čas a hrozí riziko nepřesné vložení vložky vinou špatné manipulace. Tato metoda však vyžaduje při 3D tisku použití speciálních nanášecích trysek. Tyto vložky mají nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu i kroutícího momentu. [12,14]



Obrázek 16 IBA vložka

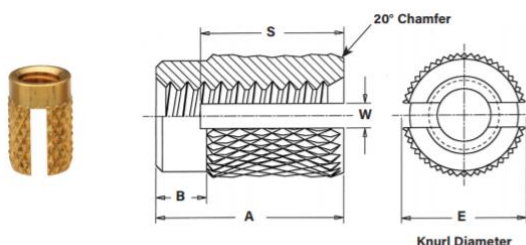
1.12.4 Lisované vložky

Vložky lisované za studena jsou velmi dobrou alternativou díky své ekonomičnosti, protože se snadno instalují a obvykle nevyžadují speciální pomocné vybavení.

Expanzní vložky jsou typ vložek, které jsou po straně proříznuté, což umožňuje sevření závitové vložky při vkládání do díry a tím je lze snadno vložit bez vyvinutí nadměrné síly. Když je do vložky nainstalován šroub, strany této vložky jsou

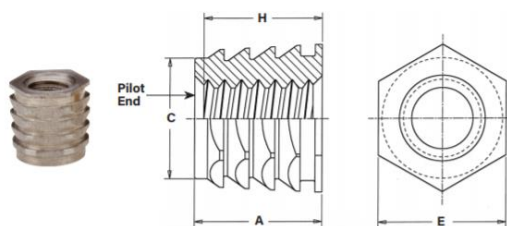
vytlačovány směrem kolmým k ose vložky. Tato síla způsobí zakousnutí zoubků do materiálu a tím vznikne poměrně dobrý kontakt se stěnou otvoru.

Nevýhodou této metody je vyvinutí větších kroutících momentů při instalaci šroubu z důvodu expanze vložky v penetrovaném materiálu.



Obrázek 17 PPB vložka

Lisované vložky mají neměnný celistvý tvar a vyžadují použití lisu, nebo jiné, dostatečně velké síly. I když s tato metoda neřadí mezi nejpevnější spojení, může poskytnout dobrou alternativu. [12,14]



Obrázek 18 NFPA vložka

1.13 Tištění závitů

Tištění závitů se používá zejména při výrobě prototypových dílů, kdy je potřeba simulovat závit s velkým průměrem nebo atypickým profilem, kde nejsou kladeny nároky na vysokou pevnost spoje, či častou montáž a demontáž prvku. Také jsou užívány u spojů, kdy z konstrukčního hlediska nelze vytvářet příruby pro uchycení šroubového spoje, například u plastových spojek trubek atd. Nespornou výhodou této metody je, že k ní není potřeba žádné další příslušenství kromě 3D tiskárny a CAD softwaru. Sevření spoje je díky teplotní roztažnosti šroubu konstantní. Většina používaných termoplastických materiálů vykazují vlastnosti elektrického izolantu, proto tato šroubová spojení neruší elektrické a magnetické pole, nekoroďují a jsou lehké. [7]

Nevýhodou metody je, že lze jen s těžkostí vyrobit přesný profil závitu, který by lícovál zároveň s maticí a šroubem, navíc jediná vhodná možnost tisku šroubu je tisknout osu šroubu v ose tisku Z. Příliš mnoho proměnných vstupuje do výsledné kvality, a proto nelze určit přesné doporučení, jak šroub tisknout, ani zatím žádná vědecká publikace nepojednává o této problematice. Na kvalitu a přesnost lícování šroubového spojení má vliv rychlost tisku, výška vrstvy, teplota extrudéru, průměr trysky nebo tištěný materiál atd. Pokud člověk chce vytisknout závitové spojení, musí najít kompromis mezi vším a

experimentovat s průměry závitů. Existují pouze neodborné články, které doporučují například tisknout matici s trochu větším průměrem než šroub. [7]

1.13.1 Vhodnost profilu závitu ke 3D tisku

Autorovi není známa žádná vědecká práce ani publikace, která by hodnotila výhodnost typu závitu k použití 3D tisku. Podařilo se mu pouze dohledat neodborné články věnující se doporučení tisknutí metrického závitu. Avšak, kdyby se vycházelo ze základních zákonitostí a možností 3D tisku, tak by šlo vyvést důsledky chyb a doporučit vhodnější profil k tisknutí na 3D tiskárně.



Obrázek 19 Výsledná kvalita tisku bez použití podpor

Se zvyšujícím se úhlem hrany nebo plochy modelu k ose tisku Z klesá kvalita tisku. Při úhlech hran či ploch blížících se 45° je povrch hrubý a nepřesný. Pokud je úhel, na který tryska nanáší filament, větší než 45° , je nutné vytváření podpor k udržení nanášeného materiálu. Hrany u dílů vyrobených 3D tiskem mají vždy určitý rádius, vlivem nanášení materiálu o daném průměru trysky.

Aby tisk závitu korespondoval s vhodnými vlastnosti 3D tisku, bylo by vhodnější použít například Edisonův závit, který má oblý profil šroubovice. Pro lepší lícování šroubového spoje je také lepší volit šrouby s hrubou roztečí a větším jmenovitým průměrem.[22]

1.14 Řezání závitů na tištěných dílech

Výroba závitů na předtištěných dírách a hřídelích je nejjednodušší způsob jak lehce a rychle vytvořit přesný závit. Základním způsobem vytváření plastových závitů je jejich ruční řezání. Tato činnost se provádí pomocí závitořezných nástrojů stejných jako u řezání závitů kovů. Závity vnitřní řezeme pomocí závitníků. Závitník je nástroj podobající se šroubu, má řezný kužel a podélné drážky k odvádění třísky. Pro řezání závitů vnějších se používají vnější závitové čelisti. Nízká teplota tavení plastů pro 3D-tisk omezuje použití vysokých otáček pro řezání závitů.



Obrázek 20 Závitník a závitové očko

1.15 Použití Nylonových šroubů

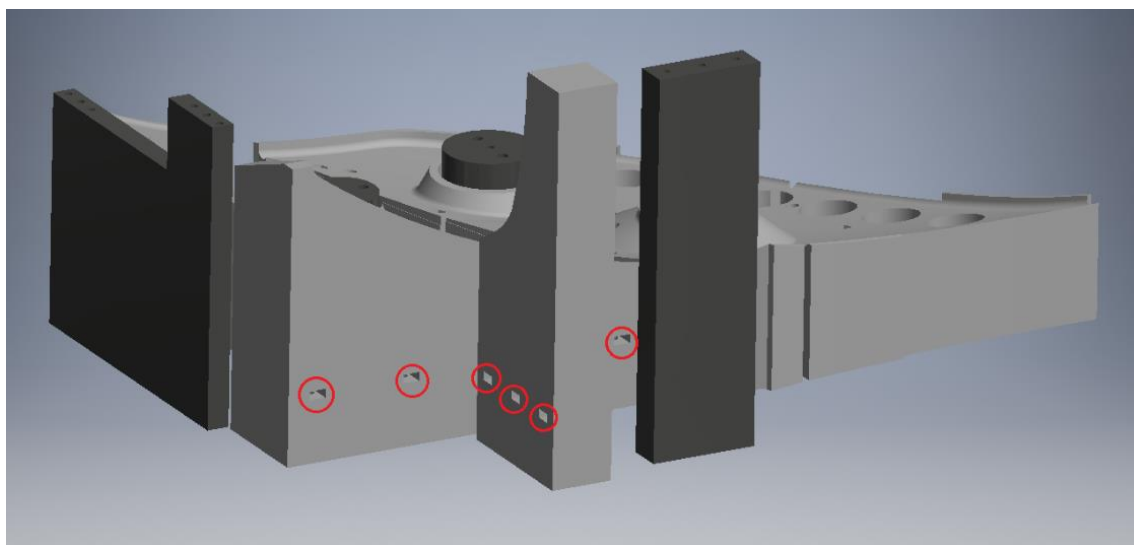
Nylonové šrouby jsou vhodné pro četné průmyslové a elektronické aplikace. Tyto spojovací prvky jsou vyrobené z pevného a přesto lehkého materiálu. Typické použití zahrnuje elektrická zařízení, desky s plošnými spoji a domácí spotřebiče. [11]



Obrázek 21 Nylonový šroub M6

1.16 Kapsa pro matici

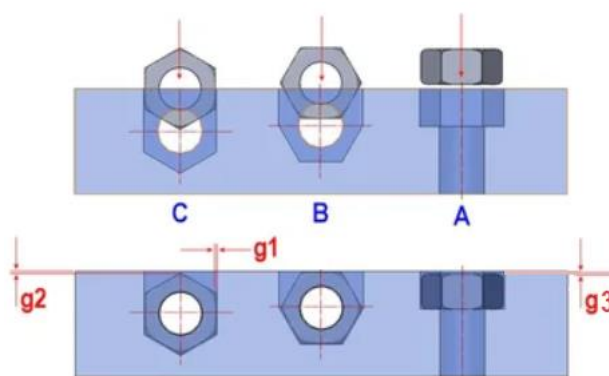
Tento typ upevnění je používán v sériové výrobě, pro jeho jednoduchost a účelnost, pokud konstrukce plastového dílu umožní vytvořit kapsu pro matici. Toto spojení umožňuje opakovatelně montovatelný a demontovatelný spoj s vysokou odolností v tahu a zejména v krutu.



Obrázek 22

Tištěný přípravek k lepení světla nízkopodlažního autobusu SOR NS 12

V případě použití této metody musí výtisk obsahovat předem navrhnutou kapsu, kopírující tvar matice pro ideální vložení matice. Kapsa by měla mít vůle výšky, hloubky a šířky kapsy, avšak vůle šířky by neměla být příliš velká pro zachování velikosti krouticího momentu. Vůle hloubky kapsy zajišťuje, aby matice nevykukovala z výtisku. V zásadě se používají 3 typy návrhu kapes (typ A, B, C) viz obrázek 23.



Obrázek 23 Možnosti vytvoření kapsy pro matici

Tato metoda také umožňuje užití čtvercových matic pro zvýšení maximálního krouticího momentu či nylonových šroubů a matic pro jejich antikorozi a elektroizolační výhody. [8,9]

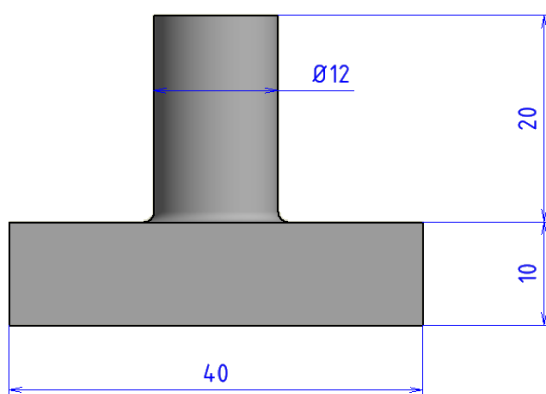
1.17 Návrh domku

Testovací vzorek má zadané omezující rozměry domku, pro který se bude hledat nejpevnější šroubové spojení, a základnu 40x40x10 mm. Samotný domek má omezující rozměry maximálního průměru 12 mm, výšky 20 mm a patního rádiusu 0,2 mm. Tyto vzorky bude autor testovat na pevnost v tahu pro jednotlivé metody šroubového spojení a hledat nejvhodnější možnosti použití.

Testovací model je vyroben z termoplastu PLA. Tento materiál je nejběžněji používaný materiál na tisk 3D modelů, má od ostatních druhů materiálů relativně nízkou teplotu tání, a to 175 stupňů Celsia. Jeho výhodou je také to, že na rozdíl od reaktoplastů má velmi malou degradaci materiálu při opětovném zahřívání přes jeho teplotu tání, tento materiál je také velmi tvrdý, avšak nevýhodou je jeho křehkost. Díky vlastnostem, které PLA vykazuje, lze použít tento materiál při metodě vkládání závitových vložek montovaných za tepla. Samotný válcový domek je tisknutý tak, že je tištěn z plného materiálu. Kvádrová podstava je tištěna s hustotou výplně 80% materiálu.

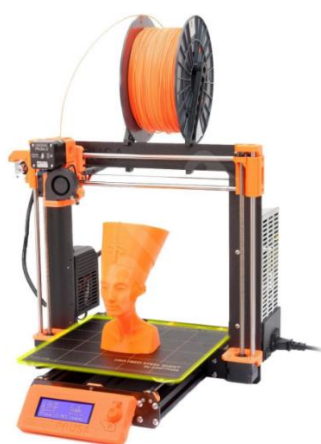
1.18 Použitá FDM tiskárna

Principem FDM 3D tiskáren je využívání materiálu v podobě tiskové struny pro tvorbu modelů. Tato struna prochází tiskovou hlavou, kde je termoplastický materiál taven do polotekutého stavu a následně je postupně nanášen na stavební podložku. V místech, kde je to potřeba, vytváří 3D tiskárna tzv. podpůrné struktury z vodou rozpustného materiálu.



Obrázek 24 Návrh domku

Pro pevnostní zkoušky jednotlivých metod spojů bylo vytištěno sedm domků na testování pevnosti šroubového spojení v tahu. Vzorky byly tištěny na FDM 3D tiskárně Prusa i3 MK3 materiálem PLA. V dnešní době je 3D tiskárna Prusa i3 MK3 nejvíce rozšířená tiskárna na světě. Vymyslel a zkonstruoval ji český konstruktér Josef Průša, který se inspiroval modelem Mendel. Konstruktér Průša konstrukci zpevnil a sestavení pro domácí montáž této tiskárny, co nejvíce zjednodušil. Podrobný návod umožňuje poměrně snadnou stavbu 3D tiskárny, a díky tomu je tato tiskárna tak masivně používána. Hlavní změnou od modelu Mendel je, že je zde nahrazena vertikální konstrukce ze závitových tyčí za obrobený plát hliníkového plechu. [4]



Obrázek 25 3D tiskárna průša i3 MK3

1.19 PLA Materiál

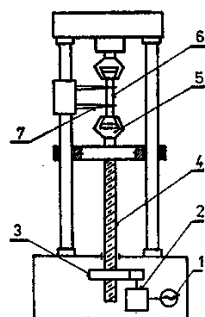
Na výrobu testovacího vzorku se použil termoplastický materiál Prusament PLA (vlastnosti materiálu viz příloha). PLA (Polylactic acid, neboli kyselina polymléčná) je biologický polyesterový plast, jež je vyráběn z kukuřičného škrobu. Je nejběžněji používaným materiálem pro 3D tisk. PLA je rozpustné pomocí tetrahydrofurénu. Případné dlouhodobé vystavení acetonu může způsobit naleptání povrchu. PLA není nijak zdravotně závadný a je biologicky rozložitelný v přírodě řízeným kompostováním.

Je velmi pevný, snadno se z něj tiskne. Protože tento materiál má velmi nízkou tepelnou roztažnost a téměř nulovou deformaci během tisku, je ideální volbou pro tisky velkých 3D modelů. Hodí se i pro tisk drobných dílů vzhledem k nízké teplotě tání. Nevýhodou tohoto materiálu je, že výtisky při teplotách nad 60°C ztrácí své mechanické vlastnosti. PLA je možno aktivně chladit při tisku, nepotřebuje vyhřívanou podložku. PLA měkne při teplotách nad 50°C. Teplota zpracování PLA je 180 – 220°C. Cena PLA struny se běžně pohybuje okolo 0,5 Kč/g.

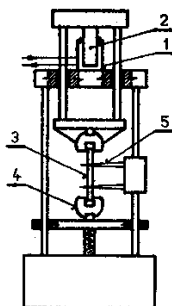
PLA vlákno bylo objeveno již v roce 1932. V 50. letech 20. století se začaly objevovat první pokusy používání PLA k výrobě chirurgických nití a implantátů.

1.20 Trhací stroj

Únosnost pevnosti šroubové spoje bude autor měřit na univerzálním trhacím stroji. Trhací stroj zatěžuje zkušební těleso jak staticky, tak může také zatížit zkušební těleso i dynamicky. Snímače na zkušebních strojích měří prodloužení tělesa a měří potřebnou sílu. Je-li zatížení potřebné ke zkoušce vyšší než 200kN, zpravidla volíme hydraulický pohon stroje. Hydraulický trhací stroj určuje sílu pomocí snímače hydrostatického tlaku oleje. Mechanický zkušební trhací stroj funguje na systému šroubů a matic a trhací síla se měří pomocí dynamometru. Nejvíce používané způsoby upnutí jsou pomocí klínových čelistí k upínání kruhových, plochých a hladkých těles s válcovými hlavami. Další používané metody upínání jsou pomocí závitových, plochých nebo osazených čelistí. [19]



Obr. 6.14. Mechanický univerzální trhací stroj
1 — elektromotor, 2 — převodovka,
3 — ozubené kolo s maticí,
4 — pohybový šroub, 5 — upínací
hlava, 6 — zkušební těleso,
7 — snímač prodloužení zkušebního
tělesa



Obr. 6.15. Hydraulický univerzální
zkušební stroj
1 — hydraulický válec, 2 — píst,
3 — zkušební těleso, 4 — upínací
hlava, 5 — snímač prodloužení
zkušebního tělesa

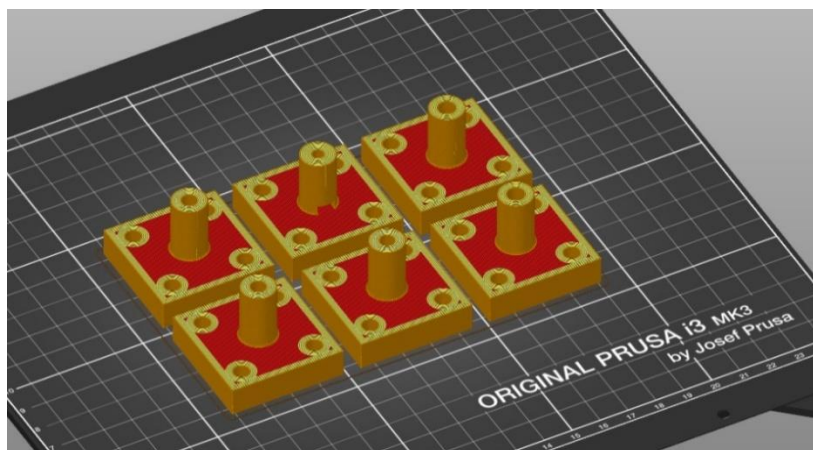
MARTINÁK, M. Kontrola a měření pro 3. ročník SPŠ strojnických. 1. vyd. Praha : SNTL, 1989.

2 Praktická část

2.1 Výroba testovacích vzorků

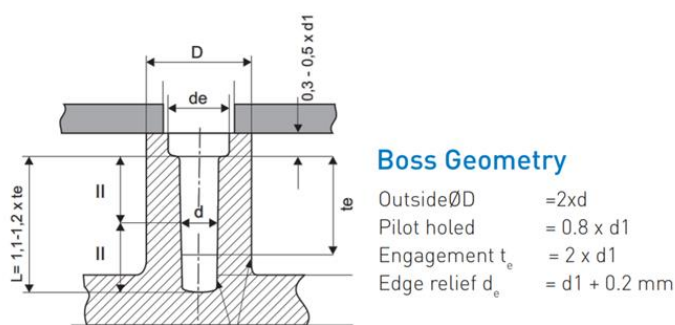
Pro objektivní porovnání vlastností jednotlivých metod se autor rozhodl pro vytisknutí sedmi stejných válcových domků, omezených daným rozměrem. s robustním podstavcem o velikosti 40x40x10mm, aby bylo zabráněno trhání vzorků v místě upnutí. Pro takto rozměrově zadaný model autor obstaral vhodné velikosti komponentů (šrouby, vruty, závitové vložky) dle doporučení výrobce.

Při 3D tisku byla použita běžná tryska s průměrem 0,4 mm, výška vrstvy 0,1 mm, tloušťka stěny 2,4 mm a teplota extrudéru 210 °C.



Obrázek 27 Výroba testovacích vzorků

Zkoušce bude vystaven 1 šroub do plastu typu Delta PT a jeho levnější alternativa vrut do dřeva. Pro šroub delta PT o průměru 6 mm a délky 20 mm se autor řídil doporučením výrobce a volil díru o velikost 4,8 mm. Pro zkoušku vrutu autor volil díru o stejném průměru i délce, u něhož použil stejný předtíštěný průměr díry.



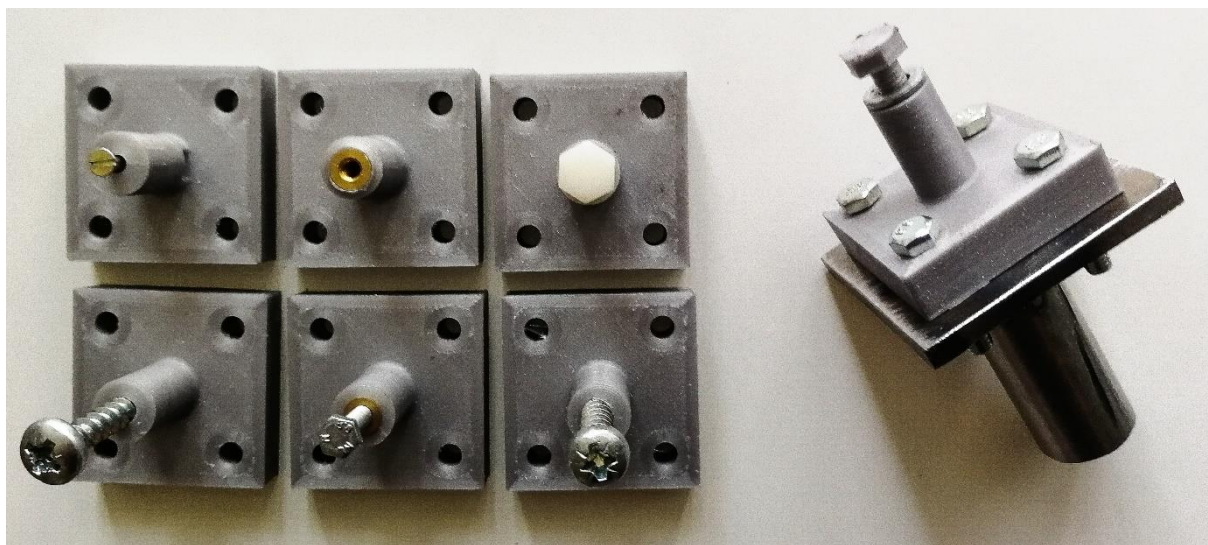
Obrázek 28 Doporučení domku pro šroub delta PT

Též byly testovány 2 druhy nejběžněji používaných závitových vložek a to vložka expanzní a vložka pro montáž za tepla se závity M4 a délkou 7,5 mm. Expanzní vložku autor nalisoval do předtíštěné díry o průměru 5,5 mm a vložku pro montáž za tepla nahřál

pomocí mikropájkky s vhodným hrotem a nastavenou teplotu cca na 220 °C a vtlačil do kuželové díry se vstupním průměrem 5,4 mm a vrcholovým úhlem 6°.

Další testovanou variantou budou dvě metody spojení plastovými šrouby. Autor se rozhodl porovnat celý tištěný spoj, tedy jak domek s tištěným vnitřním závitem, tak i tištěným šroubem. Nevýhodou této metody je čas strávený na nutnosti modelování metrického závitu, protože běžně používané CAD systémy závit nemodelují ale pouze je vykreslují texturou. Navíc, ačkoliv byla nastavena výška vrstvy 0,1 mm, nedokázala tiskárna vytisknout hladký, čistý a plynulý závit. Při zašroubovávání takto drobných vytištěných závitů o velikosti M6 hrozilo, že by šroub kvůli velkému tření mohl být ukroucen nebo mohlo dojít ke stržení závitu. Proto autor byl nucen závity proříznout závitníkem a závitovým očkem. Pro test druhé varianty autor zvolil vstříkovaný nylonový šroub a závit vyříznutý do připravené díry v domku. Pro vytváření závitů autor použil krátký strojní závitník, aby bylo docíleno nejdelšího plného závitu.

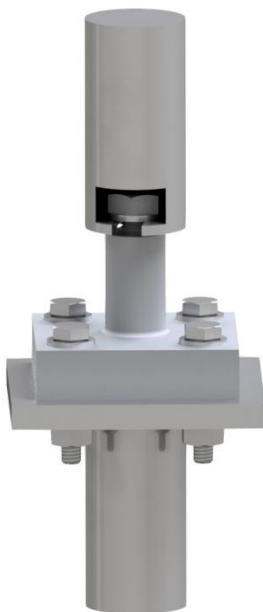
Poslední testovanou metodou bude použití kapsy pro matici. Pro tento model autor zvolil šroub a matici M3 s předtištěnou dírou pro šroub 3,5 mm.



Obrázek 29 vytištěné testovací vzorky

2.2 Příprava k testování

Výroba vzorků probíhala ve firmě Slévárna Vysoké Mýto s.r.o. na výše zmiňované 3D tiskárně Prusa i3 MK3. Pro tento daný tvar modelu musel být zhotovený speciální přípravek pro upnutí testovacích vzorků do čelistí trhačního stroje. Přípravek se skládal z ukotvovací platle, s otvory pro uchycení vzorku čtyřmi šrouby, a z tyče, s proříznutou drážkou na spodní straně, pro možnost uchycení hlavičky šroubu nebo vřutu.

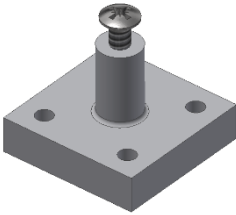
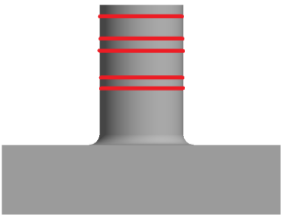
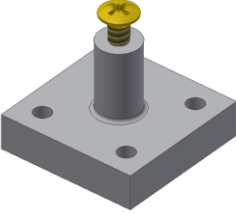
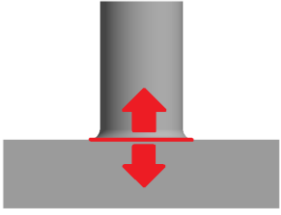
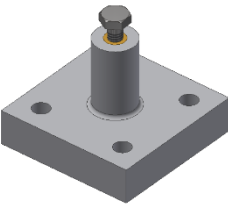
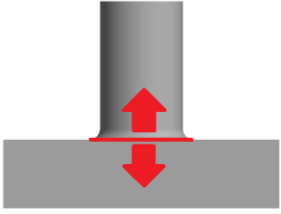
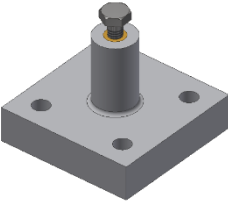
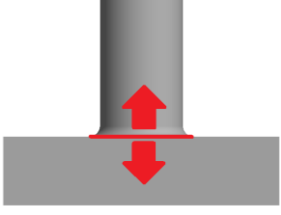
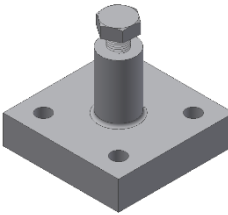

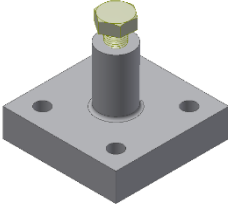
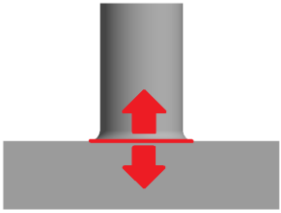
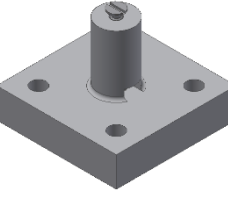
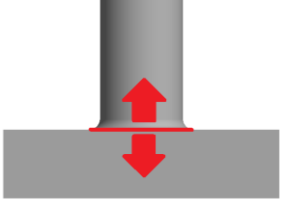


*Obrázek 30 Přípravek k upnutí
testovacího vzorku*

2.3 Průběh testování

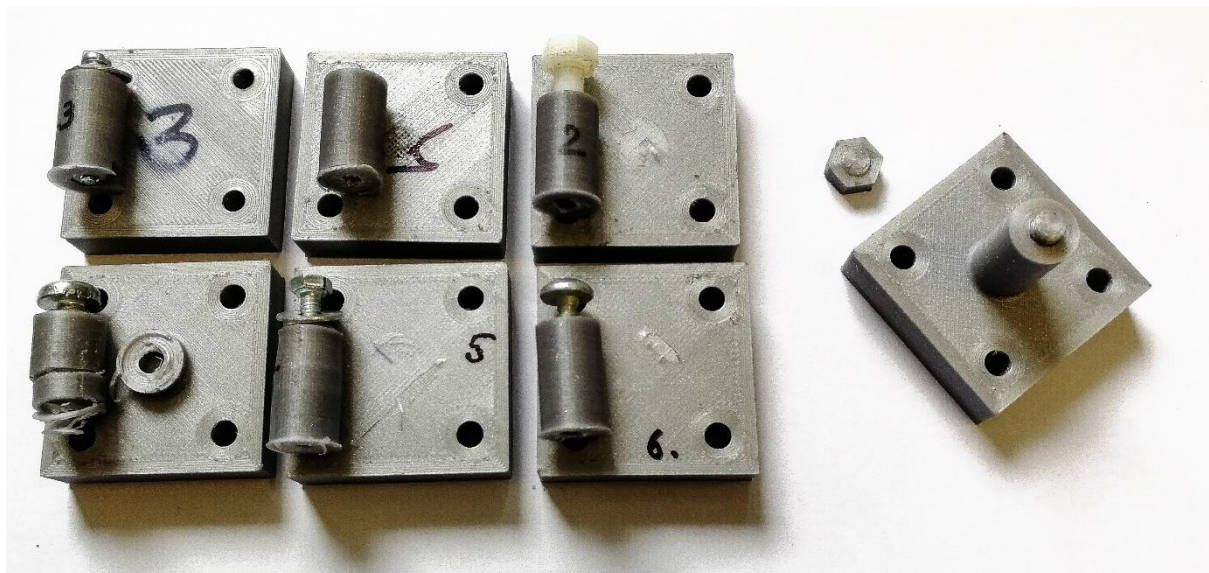
Prvotní testování tištěných vzorků v laboratoři materiálového inženýrství ČVUT pouze ukázalo z neznámých důvodů falešné výsledky v rovině nereálně vysokých hodnot. Proto další testování proběhlo v měřicím středisku firmy IVECO bus, avšak pro časovou vytíženost měřicího střediska a časově náročné tištění nových vzorků byl autor nucen otestovat pouze jednu řadu vzorků na trhačním stroji. Měření probíhalo na trhačním stroji TIRAtest 2810. Hodnoty byly naměřeny při rychlosti trhání 10 mm/min.

Tabulka 1 Porovnání metod upevnění a jejich pevností

Model	Typ šroubového spoje	Mez pevnosti v kluzu	Lom
	Vrut do termoplastu delta PT	0 N	
	Vrut do dřeva typu B	261 N	
	Expanzní vložka lisovaná	256 N	
	Vložka pro montáž za tepla	274 N	
	Šroub tištěný	57 N	
	Šroub nylonový	258 N	
	Kapsa pro vloženou matici	203 N	

Naměřené hodnoty byly odečteny a schémata lomů byla zaznamenána do tabulky. Při montáži šroubu do plastu delta PT začaly vznikat praskliny po obvodu domku a jednotlivé vrstvy se začaly delaminovat. Pro kontrolu byl vytisknut ještě jeden testovací model, který byl znovu ověřen, zdali odpovídá doporučením výrobce. Použit byl i nový šroub delta PT, pro eliminování možnosti použití vadného šroubu, avšak i při druhém zašroubování se opět objevila destruktivní delaminace. Tento nový vzorek při druhém pokusu testování dosáhl nízkých hodnot blížících se 0N.

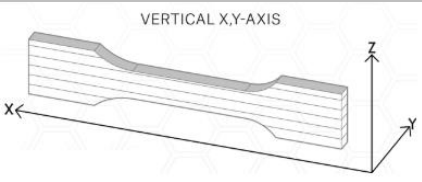
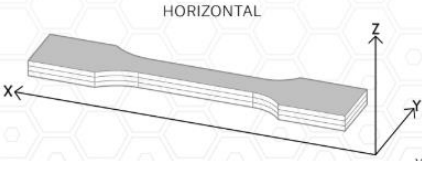
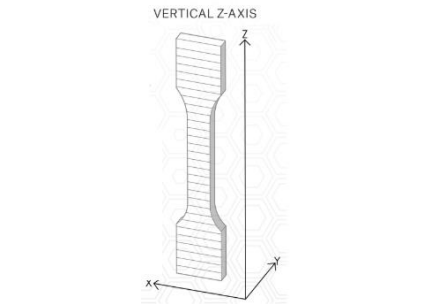
Šroub delta PT má úhel profilu závitu 30° , zatímco vrut typu B má úhel profilu 60° . Závít proto působí jako ostrý klín, který působí ve srovnání s vrutem typu B velkou axiální silou na vrstvy domku. Při použití goniometrické funkce lze jednoduše dojít k faktu, že axiální síla, která má za následek delaminaci vrstev je o 93% větší u šroubu typu delta PT než u vrutu typu B. Vyšší axiální síla má s nejvyšší pravděpodobností za následek destrukci testovacího vzorku.



Obrázek 31 destrukce testovacích vzorků

2.4 Ověření výpočtem

Tabulka 2 Vlastnosti tištěného materiálu Prusament PLA

<i>Směr tištění</i>	<i>Modul pružnosti v tahu [GPa]</i>	<i>Mez kluzu v tahu [MPa]</i>	<i>Tažnost v tahu [%]</i>	<i>rázové houževnatost plastů dle Charpy [kJ/m2]</i>
	$2,4 \pm 0,1$	$59,3 \pm 1,9$	$3,2 \pm 0,1$	$12,7 \pm 0,7$
	1. $2,2 \pm 0,1$	$50,8 \pm 2,4$	$2,9 \pm 0,3$	$12,7 \pm 0,7$
	$2,3 \pm 0,1$	$37,6 \pm 4,0$	$1,9 \pm 0,3$	$5,0 \pm 1,4$
<i>metoda</i>	<i>ISO 527-1</i>	<i>ISO 527-1</i>	<i>ISO 527-1</i>	<i>ISO 179-1</i>

$$F_e = R_e \cdot S_0$$

R_e = pevnost na mezi kluzu v tahu [MPa] = $37,6 \pm 4,0$

S = počáteční průřez vzorku [mm²]

Tabulka 3 Porovnání průřezu a pevnosti na mezi kluzu

Vzorek	Průřez	Mez kluzu	Mez kluzu teoretická
Vrut do termoplastu delta PT	 135,8 mm ²	0 N	5106 N
Vrut do dřeva	 135,8 mm ²	261 N	5106 N
Expanzní vložka lisovaná	 130,1 mm ²	256 N	4891 N
Vložka pro montáž za tepla	 145,3 mm ²	274 N	5463 N
Šroub tištěný	 21,8 mm ²	57 N	818 N
Šroub nylonový	 132,1 mm ²	258 N	4966 N
Kapsa pro vloženou matici	 103,3 mm ²	203 N	3884 N

Průměrná naměřená mez kluzu je více jak 18x menší než očekávaná mez kluzu. Při analyzování této problematiky autor došel ke skutečnosti, že k utržení vzorku nedochází vždy na místě s nejmenším průřezem, avšak na rozhraní, kde se mění strategie trajektorií nanášeného materiálu.

3 Závěr

Cílem této práce bylo teoreticky popsat metody možných šroubových spojení u dílů vyrobených technologií 3D tisk FDM. Popsat jejich přednosti a nedostatky jak po stránce mechanické, technologické a ekonomické, tak po stránce časové náročnosti. Změřit maximální pevnost spoje zatíženého na tah a okomentovat výsledek.

Popsáno bylo celkem 7 různých metod šroubového spojení. Z mechanického hlediska jsou nejvýhodnější závitové vložky, které vykazují vysokou mez kluzu a zároveň při opětovné montáži a demontáži nedochází k tak velkému opotřebení jako u jiných metod. Z ekonomického hlediska je nejvýhodnější běžný vrut do dřeva, který finančně vyjde průměrně na 1/30 ceny speciálního šroubu do plastu, navíc po technologické stránce není potřeba žádná další úprava předtištěného domku. U metody spojení vrutem typu delta PT došlo k opakované destrukci domku při montáži. Proto lze určit, že tato metoda není příliš vhodná pro použití při spojování součástí z materiálu PLA.

Tahovou zkouškou byl zjištěno, že průměrná naměřená mez kluzu je více jak 18x menší než vypočtená mez kluzu. Při analyzování této problematiky autor došel ke skutečnosti, že k utržení vzorku nedochází vždy na místě s nejmenším průřezem, avšak na rozhraní, kde se mění strategie trajektorii nanášeného filamentu.

Bohužel nelze přesně potvrdit, které šroubové spojení má nejvyšší pevnost v tahu, protože doporučené rozměry konstrukce domku závitového spojení nedovolí jít na hranici destrukce samotného spoje. Lze však pouze říci, že při tvorbě běžně používaných domků nevzniká pevnostní omezení přímo ve šroubovém spoji, ale v nedokonalosti propojení jednotlivých vrstev při změně strategie nanášení. Autorovi práce se nepodařilo dohledat žádnou vědeckou publikaci pojednávající o kritickém snížení pevnosti vlivem změny strategie nanášení, avšak dle dostupných dat z této bakalářské práce, odhaduje snížení pevnosti v tahu o 95,6 %. Z naměřených hodnot lze také určit, že maximální pevnost na mezi kluzu byla přímo závislá na průřezu domku modelu. Proto lze dát doporučení, pokud to konstrukční rozvržení modelu dovolí, tisknout stejnou nanášecí strategii nebo zvýšit průřez domku, či přidat podpěry pro zvýšení pevnosti při použití materiálu PLA.

Seznam použitých zdrojů

- [1] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTUM, 2010 [cit. 1-5-2015]. ISBN 978-80-214-2629-0
- [2] KOCHMAN, Josef. Části strojů: díl I. 1. vyd. Praha: ČSAV, 1956.
- [3] 3D Printing: Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method. 3D Printing [online]. 2015 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [4] Prusa i3. RepRap.org [online]. 2016 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3
- [5] NĚMEC, Jiří. Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 52 s. Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [6] The PolyJet Matrix 3D Printing Services Process. [online]. 2013 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: www.proto3000.com/polyjet-matrix-3d-printing-services-process
- [7] BENSOUSSAN, annah. *3D Printed Screws & Threads: Which 3D Printing Material, Which Design?* [online]. Mar 29, 2017 [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/29/3d-printed-screw-threads-which-material-which-design/>
- [8] theGHIZmo. *CAPTIVE NUTS AND MORE IN 3D PRINTING* [online]. [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/CAPTIVE-NUTS-AND-MORE-IN-3D-PRINTING/>
- [9] Mark Heywood. *Hex Nut Capture Socket sizing for 3D Printing* [online]. September 26, 2013 [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://airtripper.com/1594/hex-nut-capture-socket-sizing-for-3d-printing/>
- [10] Sean Thomas. *From Snap Fits to Adhesives: A Comprehensive Guide to Mechanical Fastener Options* [online]. May 27, 2016 [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://www.fictiv.com/blog/posts/from-snap-fits-to-adhesives-a-comprehensive-guide-to-mechanical-fastener-options>
- [11] Jet Press. *Průmyslové komponenty* [online]. [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: https://www.simaf.cz/media/wysiwyg/Katalogy/Pr_myslov_komponenty_od_s_tr173.pdf
- [12] Penn engineering. *Threaded inserts for plastic* [online]. [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: https://www.pemnet.com/fastening_products/pdf/sidata.pdf
- [13] PLEWA, Kat. *Designing and 3D printing threads* [online]. Oct 31, 2018 [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/10/31/step-by-step-easy-guide-designing-and-3d-printing-threads/>
- [14] *Inserts for plastic* [online]. Oct 31, 2018 [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: http://www.specialinsert.it/wp-content/uploads/2016/09/Catalogo_Plastica_ING_05.pdf

- [15] Penn Engineering. *Four Ways To Tackle Threaded Inserts For Plastics* [online]. [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://www.pemnet.com/fastening-products/four-ways-to-tackle-threaded-inserts-for-plastics/>
- [16] TROUGHTON, Michael John. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. 2nd ed. Cambridge, UK: TWI/The Welding Institute, c2008. ISBN 978-081-5515-814.
- [17] Joshua Vasquez. *THREADING 3D PRINTED PARTS: HOW TO USE HEAT-SET INSERTS* [online]. February 28, 2019 [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2019/02/28/threading-3d-printed-parts-how-to-use-heat-set-inserts/>
- [18] [18] Stanley. *Engineered Threaded Fasteners for Plastics* [online]. 09.2015 [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2019/02/28/threading-3d-printed-parts-how-to-use-heat-set-inserts/>
- [19] KUBOVÁ, K. Historie. Jednoduché stroje [online článek]. 24. 2. 2011 [cit. 1-5-2015]. Dostupné z: <http://kristynkakubova.blog.cz/1102/historie>
- [20] MRAZ, Stephen. What's the Difference Between Thread-Forming and ThreadCutting Tapping Screws? Machine design [online]. 2015 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/fasteners/whats-difference-betweenthread-forming-and-thread-cutting-tapping-screws>
- [21] Martinák, M. *Kontrola a měření pro 3.ročník SPŠ strojnických*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989
- [22] Yves. *Review of the Pirx 3D Printer – A Great Value for Money Option* [online]. November 19, 2014 [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <http://3dprintingforbeginners.com/pirx-3d-printer-review/>

Seznam použitých zkratek a symbolů

PLA - Polylactic acid (kyselina polymléčná)

3D - trojdimenzionální prostor popsán třemi rozměry

RP - rapid prototyping

FDM - Fused Deposition Modeling

FFF - Fused Deposition Modeling

R_e - pevnost na mezi kluzu v tahu

S_0 - počáteční průřez vzorku

F_e – působící síla

Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1 Schéma FDM tisku	5
Obrázek 2 Přečerpávací šroub	6
Obrázek 3 Teplotní roztažnosti materiálů	7
Obrázek 4 Graf závislosti času na svěrné síle	8
Obrázek 5 Vznik vrubu	8
Obrázek 6 Porovnání vrutu a speciálního šroubu do plastu	10
Obrázek 7 Porovnání profilu závitu	10
Obrázek 8 Porovnání průřezů vrutu a speciálního šroubu do plastu	11
Obrázek 9 Graf závislosti kroutícího momentu na hloubce průniku	12
Obrázek 10 Šroub delta PT	12
Obrázek 11 Šroub Hi-Lo	13
Obrázek 12 Šroub Plastite	13
Obrázek 13 Domek a jeho použití	14
Obrázek 14 odhadovaná síla proti vytržení	15
Obrázek 15 IUA vložka	16
Obrázek 16 IBA vložka	16
Obrázek 17 PPB vložka	17
Obrázek 18 NFPA vložka	17
Obrázek 19 Závítník a závitové očko	19
Obrázek 20 Nylonový šroub M6	19
Obrázek 21 Tištěný přípravek k lepení světla nízkopodlažního autobusu SOR NS 12 ..	19
Obrázek 22 Možnosti vytvoření kapsy pro matici	20
Obrázek 23 Návrh domku	21
Obrázek 24 3D tiskárna průša i3 MK3	21
Obrázek 25 Mechanický a Hydraulický trhací stroj	22
Obrázek 26 Výroba testovacích vzorků	23
Obrázek 27 Doporučení domku pro šroub delta PT	23
Obrázek 28 vytištěné testovací vzorky	24
Obrázek 29 Přípravek k upnutí testovacího vzorku	25
Obrázek 30 destrukce testovacích vzorků	27

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání metod upevnění a jejich pevností.....	26
Tabulka 2 Vlastnosti tištěného materiálu Prusament PLA.....	28
Tabulka 3 Porovnání průřezu a pevnosti na mezi kluzu.....	29

Přílohy

- Doporučené rozměry výrobcem pro šroub delta PT
- Doporučené rozměry výrobcem pro expanzní vložku
- Doporučené rozměry výrobcem pro vložku lisovanou za tepla
- Datasheet o tištěném materiálu Prusament PLA
- Obrázek změny strategie tisku v místě lomu na testovacích modelech